

Simulation als epistemologische Grundlage für intelligente Roboter

Andreas Tolk¹, Umut Durak²

¹The MITRE Corporation

²Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V. (DLR)

atolk@mitre.org

Simulation spielt eine entscheidende Rolle für die Realisierung intelligenter Roboter. Ein Roboter muss seine Umgebung wahrnehmen, eine sinnvolle Perzeption aus der zu dem vorhandenen Wissen und der neuen Information bilden, unter möglicher Berücksichtigung von Beiträgen weiterer Roboter oder Anwender zu einer Entscheidung kommen, und diese Entscheidung in eine Aktivität umsetzen. Der vorliegende Beitrag zeigt auf, an welchen Stellen in diesem Kontrollkreis die Simulation zum Einsatz kommt, welche epistemologischen Einschränkungen den Einsatz der Simulation beeinflussen, und was dies für intelligente Roboter bedeutet.

1 Einleitung

Der vorliegende Beitrag fasst die wesentlichen Erkenntnisse aus zwei Gastvorträgen zusammen, die für die internationalen Arbeitstreffen der NATO zum Thema “*Modelling and Simulation for Autonomous Systems*” gehalten wurden [1, 2].

Zunächst wird die Topologie von Robotern vorgestellt, die einen einfachen Vergleich zu intelligenten Softwareagenten erlaubt, deren Topologie in [3] in gleicher Weise definiert wurde. Dieser Vergleich verdeutlicht die topologische Nähe von autonomen Robotern und intelligenten Softwareagenten, da sowohl die Komponenten, wie auch die durchzuführenden Schritte sehr ähnlich sind. Das Ergebnis dieses Vergleichs ist, dass die Algorithmen, die einen intelligenten Softwareagenten implementieren, auch die Implementierung eines intelligenten Roboters erlauben.

Kern dieser Algorithmen bilden die Eigenschaften, eine Situation zu erkennen, und auf Grund dieser Situation und eines gegebenen Zieles, eine Aktivität auszuwählen, die durchgeführt werden soll. Deshalb werden die Grundlagen der Maschinenerkennung beschrieben, die das Erkennen einer Situation und die Notwendigkeit zum Handeln erlauben [4]. Von besonderer Bedeutung ist hierbei, dass nicht nur die aktuelle Situation erkannt wird, sondern dass von dieser

auch auf zukünftige Entwicklungen extrapoliert werden kann. Dieser Abschnitt verdeutlicht, in welchen Schritten dieses Prozesses Simulationstechnik eine entscheidende Rolle spielt.

Im letzten Abschnitt werden die epistemologischen Einschränkungen der Simulation generell und in Bezug auf ihren Einsatz zur Implementierung von intelligenten Robotern verdeutlicht. Die Grenzen definieren, was grundsätzlich epistemologisch mit Simulationen verwirklicht werden kann. Auch wenn Simulation die beste Methode ist, welche die Implementierung eines intelligenten Roboters erlaubt, so gibt es dennoch Grenzen, die dem Wissenschaftler bekannt sein müssen.

2 Topologie von Robotern

In diesem Beitrag soll gezeigt werden, warum Simulationstechnik für die Implementierung intelligenter Roboter notwendig ist. Eine der unterstützenden Thesen in [1] ist, dass autonome Roboter und intelligente Softwareagenten topologisch und konzeptionell verwandt sind. Wenn diese Beziehung motiviert werden kann, dann können die wissenschaftlichen Erkenntnisse beider Anwendungsgebiete kombiniert werden.

Das *National Institute of Standards and Technology* (NIST) definiert Autonomie für Roboter wie folgt:

“The condition or quality of being self-governing. When applied to unmanned autonomous systems (UAS), autonomy can be defined as UAS’s own ability of integrated sensing, perceiving, analysing, communicating, planning, decision-making, and acting/executing, to achieve its goals as assigned by its human operator(s) through designed human-robot interface (HRI) or by another system that the UAS communicate with.” [5].

Autonomie beinhaltet somit die Fähigkeiten, seine Umwelt wahrzunehmen, eine Perzeption der aktuellen Situation zu erstellen, diese zu analysieren und mit anderen System zu kommunizieren, zu planen, zu einer Entscheidung zu kommen, und diese Entscheidung in Aktivitäten umzusetzen.

Ein Roboter benötigt damit die in Abbildung 1 gezeigten Komponenten, welche in [6] im Detail erklärt werden.

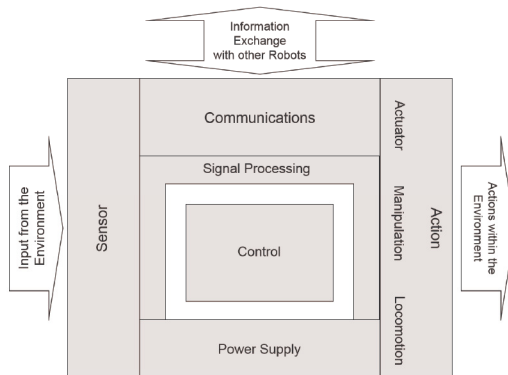


Abbildung 1: Topologische Struktur eines Roboters

- Roboter benötigen *Sensoren*, um ihre Umgebung wahrnehmen zu können.
- Sie benutzen *Kommunikationsmittel*, z.B. Radios, um mit anderen Systemen in Verbindung treten zu können.
- Sie setzen ihre Entscheidungen mit Hilfe von *Aktuatoren*, *Manipulatoren*, und *Lokomotoren* um. Aktuatoren platzieren Komponenten des Roboters in die notwendige Position, z.B. richten sie Antennen aus, platzieren einen Greifarm, usw. Manipulatoren interagieren mit Objekten der

Umwelt. Lokomotoren bewegen den Roboter. Dies können einfache Räder sein, oder die komplexen Elemente eines unbemannten, fliegenden Roboters.

- Alle diese Elemente sind über *Signalprozessoren* mit der *Steuerung* in der Kontroll- und Steuerungseinheit verbunden.
- Die *Energieversorgung* (Power Supply) versorgt alle Komponenten mit der notwendigen Energie, in der Regel in Form von Batterien, die Strom zur Verfügung stellen.

Intelligente Softwareagenten existieren in der virtuellen Welt, haben aber ähnliche Eigenschaften. Tolk und Uhrmacher [3] haben die wesentlichen Attribute eines Agenten nach einer umfangreichen Literaturrecherche zusammengefasst. Die resultierende Topologie ist in Abbildung 2 dargestellt.

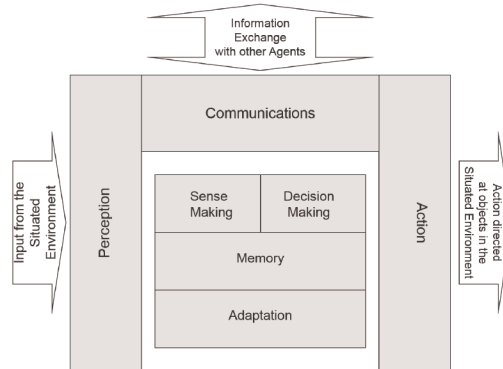


Abbildung 2: Topologische Struktur eines intelligenten Softwareagenten

- Intelligente Softwareagenten nehmen ihre Umgebung durch ein *Perzeptionsmodell* wahr.
- Über das *Kommunikationsmodell* können Softwareagenten mit anderen Agenten – oder auch mit dem Benutzer – Information austauschen.
- Das *Aktionsmodell* agiert mit der Umwelt.
- Das *Steuerungsmodell* eines intelligenten Softwareagenten ist etwas detaillierter erfasst.
 - Ein genereller *Speicher* (Memory) beinhaltet die Nutzwertfunktionen, deren Parameter, und andere Daten und Algorithmen, die benötigt werden.

- Dies erlaubt das Erkennen und Feststellen einer aktuellen *Situation* (Sense Making). Die Beurteilung der festgestellten Situation in Bezug auf die Ziele ist Teil des Prozesses.
- Das *Entscheidungsmodell* (Decision Making) wählt eine Aktion aus, die die erkannte Situation näher an die gewünschte Situation bringt. Nichts zu tun ist eine erlaubte Handlung.
- Ein wesentlicher Bestandteil der Lagebeurteilung der folgenden Zyklen ist festzustellen, ob die zuvor durchgeführten Aktionen erfolgreich waren. Ist dies der Fall, so wird in einer ähnlichen Situation die Auswahl der gleichen Aktion mehr wahrscheinlich. Sollte dies nicht der Fall sein, ist die Auswahl eher unwahrscheinlich. Dies wird über das Adaptionsmodell geregelt.

Sowohl autonome Roboter, als auch intelligente Softwareagenten, nehmen somit ihre Umgebung über Sensoren wahr, kommunizieren mit anderen über die Perception und können an einem koordinierten Plan arbeiten, und setzen diesen Plan in Form von Aktivitäten um.

3 Grundlagen der Maschinenerkennung

Zeigler [4] beschreibt die Grundlagen der Maschinenerkennung als einen Prozess mit vier Phasen, die in Abbildung 3 schematisch erfasst sind. Ziel für das beobachtende System auf der rechten Seite ist, das beobachtete Objekt auf der linken Seite zu erkennen, und dessen Möglichkeiten zu Handeln richtig einzuschätzen.

- In der Phase (1) muss das beobachtende System zunächst mit Hilfe der Sensoren seine Umwelt erkennen. Um das zu erkennende Objekt mit den Sensoren erfassen zu können, muss dieses Attribute besitzen, deren Eigenschaften von den Sensoren aufgenommen werden können. Weiterhin müssen diese Eigenschaften hinreichend verschieden von denen der Umgebung sein, so dass eine Diskriminierung zwischen Objekt und Umwelt möglich ist.

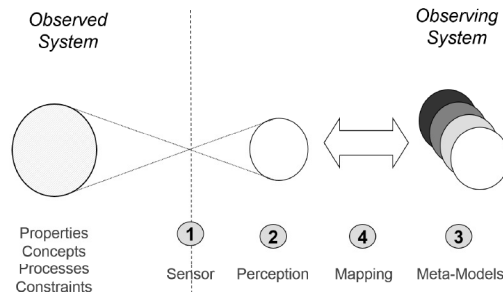


Abbildung 3: Logische Schritte der Maschinenerkennung

- In Phase (2) werden die beobachteten Werte in eine Perception eingebettet. Alle beobachteten Attribute werden in das Perceptionsmodell aufgenommen. Wenn das Modell nicht alle Beobachtungen unterstützt, dann können nur die abgebildeten Daten berücksichtigt werden. Das der Perception zugrundeliegende Datenmodell ist daher sehr wichtig.
- In der Phase (3) wird nun ein Metamodell ausgewählt, das die beobachteten attributierten Konzepte am besten widerspiegelt. Dieses Metamodell beinhaltet nicht nur die statischen Eigenschaften der Interpretation der Beobachtung, sondern auch die dynamischen Eigenschaften.
- Die letzte Phase (4) stellt eine Verbindung zwischen dem beobachteten Objekt und seiner Interpretation durch das Metamodell her. Die Maschine hat nun ein Objekt erkannt, und kann vorhersagen, was dieses Objekt in der aktuellen Situation tun kann, da diese Optionen mit dem Metamodell verknüpft sind.

Maschinenerkennung ist somit die Verknüpfung einer Beobachtung über ein statisches Datenmodell mit einem dynamischen Metamodell.

Eine Maschine kann lernen, wenn die Familie der Metamodelle modifiziert werden kann. Einfache Versionen erlauben die Kalibrierung der Metamodelle, um neue Objekte erkennen zu können. Ein Beispiel hierfür ist die generelle Beschreibung eines Autos mit beobachtbaren Attributen, und dann die Population verschiedener Automarken mit den charakteristischen Parametern. Kompliziertere Lernalgorithmen erlauben, auch neue Metamodelle zu definieren, was aber in der Regel einen kreativen Prozess erfordert.

Diese Grundlagen der Maschinenerkennung spiegeln die wissenschaftliche Methode wieder. Die Metamodelle repräsentieren bekannte Theorien. Die Beobachtung der Objekte entspricht einem Experiment. Wenn die Beobachtung durch eine der Theorien erfasst ist, dann kann diese dem entsprechenden Metamodell zugeordnet werden. Ist dies nicht der Fall, so muss entweder eine bestehende Theorie erweitert, oder eine neue Theorie entwickelt werden.

Roboter erkennen Objekte in ihrer Umwelt nach dem gleichen Prinzip. Oftmals wird dabei übersehen, dass die Metamodelle in einer Form implementiert sein müssen, die den Prinzipien der Simulation entsprechen, wenn die dynamischen Eigenschaften der erkannten Objekten berücksichtigt werden sollen. Simulation spielt damit eine wesentliche Rolle, um intelligente Roboter zu ermöglichen.

Wann immer eine Vorhersage der zukünftigen Entwicklung der Situation notwendig ist, muss eine Simulation durchgeführt werden. Wann immer der Vergleich zweier Alternativen durchgeführt werden sollen, müssen diese Alternativen simuliert werden. Interpolation und Extrapolation werden durch Anwendung von Simulationstechniken ausführbar.

Simulationstechnik ermöglicht es, dynamisches Wissen für die Roboterkontrolle zur Verfügung zu stellen. Es ist deshalb besonders wichtig, sich über die epistemologischen Grenzen im Klaren zu sein, die in dem nächsten Abschnitt behandelt werden.

4 Epistemologische Grenzen

Epistemologie – auch Erkenntnistheorie genannt – ist der Zweig der Wissenschaftsphilosophie, der sich mit der Frage beschäftigt, wie Erkenntnis und Wissen abgeleitet werden können. In Zusammenhang mit Simulationstechniken ist die Frage der Epistemologie: Kann die Anwendung von Simulation zu neuen Erkenntnissen oder neuem Wissen beitragen? Da wir im letzten Abschnitt die Wichtigkeit der Simulationstechnik zur Erfassung der dynamischen Aspekte der Umweltswahrnehmung und -einschätzung dargestellt haben, ist diese Frage unmittelbar für die Implementierung intelligenter Roboter von Bedeutung.

Die Hierarchie von Daten (**D**ata) zu Information (**I**nformation) zu Wissen (**K**nowledge) zu Weisheit (**W**isdom) wurde von Ackoff in form der DIKW Pyramide vorgestellt [7]. Daten sind faktische und punk-

tuelle Beobachtungen von Attributen. Durch das Verständnis der Beziehungen – generell in Form eines Datenmodells, z.B. das vorgestellte Perzeptionsmodell – werden die Daten attribuierten Konzepten zugeordnet, was zu Information führt. Die Zuordnung von Metamodellen entspricht dem Verständnis von Mustern in einem ausführbaren Kontext, was in Wissen resultiert. Wenn nun mehrere Alternativen untersucht werden können, so führt dies zum Verständnis von Grundsätzen, oder auch Weisheit. Modellbildung und Simulation spielen somit eine entscheidende Rolle um vom Boden der DIKW Pyramide bis an ihre Spitze zu kommen.

Nichtsdestotrotz muss bedacht werden, dass Simulation nur einen Teil der Realität repräsentiert, da sie auf einem Modell basiert, welches eine zielgerichtete, bewusste Vereinfachung und Abstraktion einer Perception der Realität ist. Die Perception ist durch physikalische, kognitive, und legale/moralische Einschränkungen definiert:

- *Zielgerichtet:* Eine Simulation soll eine Aufgabe erfüllen, z.B. eine wissenschaftliche Frage beantworten, oder eine Trainingsvorgabe erfüllen.
- *Bewusst:* Modellierung ist eine kreative, gezielte Tätigkeit, um die Simulationsaufgabe zu ermöglichen.
- *Vereinfachung:* Alle Konzepte und Beziehungen, die zur Erreichung der Simulationsaufgabe nicht als nötig erachtet werden, werden im Rahmen der Modellbildung identifiziert und eliminiert.
- *Abstraktion:* Alle Konzepte und Beziehungen, die zur Erreichung der Simulationsaufgabe notwendig sind, werden auf dem angemessenen Abstraktionslevel modelliert.
- *Perzeption der Realität:* Unser Verständnis der Realität ist von vielen Faktoren abhängig. Dies gilt insbesondere auch für Teams und individuelle Teammitglieder. Zwei Experten können sehr unterschiedliche Ansichten von einem zu modellierenden Problem haben.
- *Physikalische Einschränkungen:* Nicht alle Attribute, die wir beobachten möchten, können von unseren Sensoren erfasst werden.
- *Kognitive Einschränkungen:* Die Ausbildung und Erfahrungen des modellierenden Experten bestimmt, wie dieser das Problem versteht. Auch

die Modellierungsmethode kann beeinflussen, was der Experte wie wahrnimmt, bevor er es in das Modell umsetzt.

- *Legale/moralische Einschränkungen:* Anwendbare Gesetze oder auch moralische Wertvorstellungen können der Erfassung von anderweitig beobachtbaren Werten entgegenstehen.

Das resultierende Modell wird als Simulation implementiert. Es bildet die konzeptionelle Grundlage, was die Simulation später erkennen und anwenden kann. Ein Objekt, das nicht als Konzept modelliert wurde, ist nicht Teil der Realität, wie sie sich der Simulation darstellt. Eine Kausalität, die im Model als Funktion von Eingabewerten zu Ausgabewerten dargestellt ist, bildet die Basis aller kausalen Zusammenhänge, deren sich die Simulation bewusst sein kann. Als solches kann eine Simulation als ausführbare Theorie angesehen werden. Ist die Theorie solide, sollte sie zu keinen Widersprüchen beim Einsatz in der Realität führen.

Desweiteren ist zu beachten, dass Computersimulationen den Grenzen allgemeiner Computerprogramme unterliegen. Der Gödelsche Unvollständigkeitssatz zeigt die Grenzen der Ableitbarkeit von Aussagen in formalen Systemen auf [8]. Zur gleichen Zeit zeigte Turing die Grenzen der Probleme auf, die mit einem Computerprogramm gelöst werden können [9]. Deterministisches Chaos impliziert die grundsätzliche Unmöglichkeit, langfristige Vorhersagen zum Zustand eines chaotischen Systems mit einer Simulation machen zu können. Oberkampf und Kollegen [10] geben zusätzliche Beispiele, in denen computergenerierte Probleme die Vertrauenswürdigkeit von Computersimulationsergebnissen einschränken.

Computersimulationen können keine zusätzlichen Probleme lösen, die mit einem anderen Computerprogramm nicht lösbar sind.

5 Abschließende Diskussion

Nach all diesen kritischen Anmerkungen stellt sich die Frage, ob und in wieweit Simulation eine epistemologische Grundlage für Roboter bilden können? Die folgende Abbildung wurde zuerst in [3] veröffentlicht, um intelligente Softwareagenten in ihrer virtuellen Umgebung zu verdeutlichen.

Wie bereits in der topologischen Diskussion gezeigt, ist eine Anwendung auf intelligente Roboter möglich:

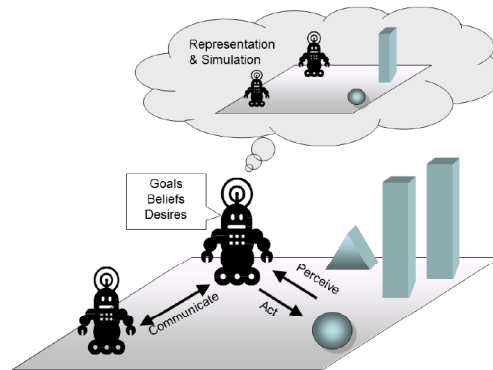


Abbildung 4: Simulation und intelligente Roboter

- Roboter nehmen über ihre Sensoren die Umwelt wahr (perceive).
- Sie kommunizieren mit anderen Robotern – oder auch Benutzern – und tauschen Informationen aus.
- Mit Hilfe der Sensorendaten und der Kommunikation erstellen Sie eine interne Interpretation der Situation. Diese enthält
 - eine Abbildung der beobachteten Objekte und ihrer Attribute,
 - eine Interpretation der Objekte mit Hilfe der Metamodelle, die dem beobachteten Objekt am ähnlichsten sind, und
 - eine Interpretation, wie sich die Situation entwickeln kann, über Simulation verschiedener Möglichkeiten des Handelns.
- Die Perzeption kann unvollständig sein, da nicht alle Objekte gesehen werden, oder auch wenn das Perzeptionsmodell nicht mächtig genug ist.
- Der Roboter agiert in seiner Umgebung (act), so dass er seine Ziele erreichen kann.

Simulationen spielen eine entscheidende Rolle in allen diesen Schritten. Das Perzeptionsmodell ist das Datenmodell, auf dem die internen Simulationen arbeiten. Nur was perzipiert wird, kann auch simuliert werden. Die Metamodelle sind Objektmodelle, die neben den Daten, die die Konzepte beschreiben, auch Methoden bereitstellen, die die Dynamik der Konzepte beschreiben. Um eine Aktion auszuwählen, werden die Auswirkungen und Effekte intern simuliert. Die internen Bewertungs-

oder Nutzwertfunktionen werden auf die Ergebnisse der Simulationen angewandt, um die beste Option auszuwählen.

Intelligente Roboter reagieren nicht nur, sie agieren, getrieben von ihren Zielen. Dies ist ohne Simulation nicht möglich. Lernen entspricht der Optimierung von Metamodellen zu den Beobachtungen, Verbesserung der Metamodelle und der Nutzwertfunktionen durch Kalibrierung, oder durch zufügen von neuen Metamodellen oder Nutzwertfunktionen. Die letzte Option verlangt allerdings einen kreativen Prozess, oder die vollständige, parametrische Abdeckung des Lösungsraumes, was nur in trivialen Umgebungen möglich ist.

Trotz der epistemologischen und computerbedingten Einschränkungen bieten Computersimulationen die beste Unterstützung für die Realisierung intelligenter Roboter. Solange das zugrundeliegende Modell eine plausible und angemessene Theorie darstellt, gibt es zur Zeit keine bessere Alternative. Allerdings muss sichergestellt sein, dass alle relevanten Attribute nicht nur über die Sensoren erfasst werden, sondern auch in das Perzeptionsmodell abgebildet werden können. Die Zahl der Metamodelle muss hinreichend groß sein, und das Abstraktionslevel muss der Problemstellung angemessen sein. Die implementierte Kausalität muss mit empirischen Beobachtungen korrelieren. Die Nutzwertfunktionen müssen die Ziele angemessen darstellen. Diese Voraussetzung sind nicht neu, sondern stellen die allgemeinen Voraussetzung für wissenschaftliche Nutzung von Modellen dar. Verifizierte Simulation von validierten Modellen ist derzeit die mächtigste Form der ausführbaren Wissensdarstellung.

Zusammenfassend kann festgestellt werden, dass die Implementierung einer Kontrollfunktion für intelligente Roboter in jedem Fall Simulationstechniken nutzen muss. Da die Kontrollmodule oftmals von Experten geschrieben werden, die keine Simulationsexperten sind, ist es durchaus möglich, dass Begriffe wie Interpolation oder Extrapolation genutzt werden, und damit der Einsatz von Simulation verschleiert wird. Nichtsdestotrotz sind dies Simulationstechniken, und der Experte sollte sich der Möglichkeiten, wie auch der Einschränkungen, wie sie in diesem Artikel beschrieben wurden, bewusst sein.

References

- [1] A. Tolk. *Merging two Worlds: Agent-based Simulation Methods for Autonomous Systems*. In: Systems with Autonomous Capabilities: Issues for Defence Policy Makers, edited by A. P. Williams, and P. D. Scharre, NATO Headquarters Supreme Allied Command Transformations (HQ SACT), Norfolk, VA: Innovations in Capability Development Publication Series, pp. 291-317, 2015.
- [2] A. Tolk. *Modeling and Simulation Interoperability Concepts for Multidisciplinarity, Interdisciplinarity, and Transdisciplinarity – Implications for Computational Intelligence enabling Autonomous Systems*. Proceedings of the Modelling and Simulation for Autonomous Systems Workshop 2015, Lecture Notes in Computer Science, Vol. 9055, Springer Verlag, pp. 60-74, 2015.
- [3] A. Tolk, A. M. Uhrmacher. *Agents: Agenthood, Agent Architectures, and Agent Taxonomies*. In: Agent-Directed Simulation and Systems Engineering, edited by L. Yilmaz and T. Ören. Wiley-Berlin, pp. 75-109, 2009.
- [4] B. P. Zeigler. *Toward a Simulation Methodology for Variable Structure Modeling*. In: Modeling and Simulation Methodology in the Artificial Intelligence Era, edited by M. S. Elzas, T. Ören, and B. P. Zeigler, North Holland, Amsterdam, pp. 195-210, 1986.
- [5] F. Kendoul. *Towards a Unified framework for UAS Autonomy and Technology Readiness Assessment (ATRA)*. In: Autonomous Control Systems and Vehicles: Intelligent Unmanned Systems, edited by K. Nonami, M. Kartidjo, K.-J. Yoon, and A. Budiyo, Springer, Tokyo, pp. 55-72, 2013.
- [6] R. Siegwart, I. R. Nourbakhsh, and D. Scaramuzza. *Introduction to Autonomous Mobile Robots, 2nd Edition*. MIT Press, Cambridge, MA, 2011.
- [7] R. L. Ackoff. *From data to wisdom*. Journal of Applied Systems Analysis 15 (1989):3-9.
- [8] K. Gödel. *Über formal unentscheidbare Sätze der Principia Mathematica und verwandter Systeme I*. Monatshefte für Mathematik und Physik 38 (1931):173–198.

- [9] A. Turing. *On Computable Numbers, with an Application to the Entscheidungsproblem*. Proceedings of the London Mathematical Society 2 (42) (1936):230–265.
- [10] W. L. Oberkamp, S. M. DeLand, B. M. Rutherford, K. V. Diegert, and K. F. Alvin. *Error and Uncertainty in Modeling and Simulation*. Reliability Engineering & System Safety 75 (3) (2002): 333-357.

Bemerkungen

Die Autoren danken Thorsten Pawletta für die Diskussionen und redaktionellen Unterstützungen im Rahmen der Erstellung dieses Beitrages.

Dieses Dokument wurde von der MITRE Corporation zur Veröffentlichung und uneingeschränkten Verteilung freigegeben. Die entsprechende MITRE PRS Vorgangsnummer ist **17-0085**.

Andreas Tolks Angestelltenverhältnis zur MITRE Corporation ist ausschließlich für Identifikationszwecke angeben und impliziert keinerlei Zustimmung der MITRE Corporation zu Positionen, Meinungen, oder Ansichten, die in diesem Beitrag dokumentiert sind.